УДК 550.42:57.4(571.1)

ГИДРОХИМИЧЕСКИЙ СТОК В БАССЕЙНЕ СРЕДНЕЙ ОБИ

О.Г. Савичев

Томский политехнический университет
E-mail: OSavichev@mail.ru

Приведены результаты изучения гидрохимического стока в бассейне Средней Оби (Западная Сибирь) и условий его формирования. Установлены средние значения выноса главных ионов, микроэлементов, органических и биогенных веществ с водами рр. Обь, Томь, Чулым, Кеть, Тым, Васюган, Парабель, Чая за 1997–2000-е гг. Показано, что основная часть гидрохимического стока представлена главными ионами и формируется под влиянием преимущественно природных факторов. Антропогенное изменение гидрохимического стока проявляется в увеличении выноса углеводородов, соединений азота и ряда других веществ.

Введение

В процессе глобального круговорота воды происходит ее непрерывное взаимодействие с породами и перемещение огромного количества растворенных веществ. В результате осуществляется никогда непрекращающееся преобразование земной коры, а в соответствии с «принципом неразрывной связи живого и мертвого», обоснованным В.И. Вернадским, и эволюция биосферы [1, 2]. С учетом этого гидрохимический сток играет исключительно важную роль в функционировании биогеоценозов разного уровня и, в свою очередь, отражает наиболее существенные изменения в их структуре и эколого-геохимическом состоянии водных объектов. Данное обстоятельство позволяет рассматривать проблему формирования и изменений гидрохимического стока как составную часть более общих проблем взаимодействия геосфер, естественных и антропогенных изменений природной среды и климата [3, 4].

Изучением этой проблемы в разное время занимались многие известные ученые, в том числе О.А. Алекин, В.П. Зверев, А. Лерман, А.М. Никаноров, Т. Пачес, А.И. Перельман, Е.В. Посохов, С.Л. Шварцев и др. Благодаря их работам были установлены масштабы денудации суши и величины массопотоков поверхностной и подземной гидросферы на уровне планеты, континентов, водосборных бассейнов океанов и морей. Достаточно много сделано и в плане изучения механизмов формирования химического состава природных вод верхней гидродинамической зоны. Тем не менее, многие вопросы, связанные с необходимостью изучения распределения гидрохимического стока

внутри крупных речных бассейнов и его формирования в условиях антропогенного воздействия, до сих пор остаются нерешенными. Это существенно ограничивает возможность разработки надежных долгосрочных прогнозов изменения качества природных вод и выработки оптимальной региональной стратегии природопользования, что и обусловливает актуальность исследований гидрохимического стока и условий его формирования.

Особое значение изучение гидрохимического стока и условий его формирования приобретает для участка бассейна р. Обь в ее среднем течении. Данная территория расположена в юго-восточной и центральной частях Западно-Сибирской равнины и северной части Саяно-Алтайской горной страны на площади более 500 тыс. км^2. Численность населения региона превышает 3 млн чел., большую часть которых составляют городские жители. Специфика хозяйственного комплекса во многом определяется наличием богатых природных ресурсов. В пределах рассматриваемой территории выделяются горные районы (южная и юго-восточная части водосбора р. Томь, верхнее течение р. Чулым), лесостепная (среднее и нижнее течение р. Томь, среднее течение р. Чулым, часть водосбора р. Шегарка) и лесная зоны (прочие территории). Плоский рельеф и слабая дренированность равнинной части региона в сочетании с избыточным атмосферным увлажнением, достаточно суровым термическим режимом и рядом других факторов обусловили исключительно широкое распространение болот, а также создали условия для формирования густой речной сети и определили основные черты гидрологического режима территории, характеризующегося хорошо выраженной широтной зональностью распределения водного стока и достаточно большой долей его подземной составляющей. Наиболее многоводные реки региона – Обь, Томь и Чулым.

Наличие в пределах обского бассейна крупнейших в России предприятий металлургической, угольной, химической, радиохимической и нефтегазовой промышленности позволило ряду специалистов сделать вывод о значительной или даже ключевой роли антропогенных факторов в формировании гидрохимического стока и химического состава речных вод региона. Если подобные суждения действительно верны, то можно говорить, как минимум, о региональных масштабах очень значительных антропогенных изменений природной среды рассматриваемой территории, в целом, и водных объектов, в частности. Учитывая научную и практическую значимость этого вопроса, целесообразно проведение его детальной проработки, которая позволила бы сделать достоверные количественные выводы о величине гидрохимического стока, характере и механизме его природно-антропогенной трансформации в обском бассейне. Именно такая цель и была поставлена в процессе выполнения рассматриваемых исследований.

Методика исследований

Исследования проводились автором в 1993–2006 гг. в последовательности: 1) изучение водного стока и водного режима; 2) гидрохимический анализ, включая выявление пространственно-временных изменений химического состава речных и подземных вод; 3) определение суммарного и подземного гидрохимического стока, выявление долгосрочных изменений ионного стока; 4) анализ условий формирования гидрохимического стока и его природно-антропогенной трансформации. Выполнение каждого из указанных этапов включало проработку вопросов методического обеспечения решения поставленных в работе задач и основывалось на бассейновом подходе.

При изучении стока использовались географо-гидрологический, ландшафтно-геохимический, статистический методы, математическое моделирование гидрохимических процессов, что и определило основные виды выполненных работ, в том числе: 1) полевые работы по отбору и консервации водных проб для дальнейшего определения их химического и микробиологического состава в стационарных лабораториях, а также определению в полевых условиях концентраций быстроизменяющихся компонентов; 2) обобщение и статистический анализ гидрохимических и гидрологических данных (было проанализировано более 8000 проб воды, при этом основную часть использованного материала составили данные Томского политехнического университета, Института геологии нефти и газа СО РАН, ОАО «Томскгеомониторинг» и Росгидромета); 3) разработку и апробацию математических моделей формирования химического состава речных вод и гидрохимического стока. Ранее, в [5–8], были изложены методика и основные результаты исследований химического состава речных вод, изменения гидрологического и гидрогеологического режима территории, величины ионного стока и условий его формирования. В рассматриваемой работе проведено обобщение этих и других материалов и представлена общая картина гидрохимического стока в бассейне Средней Оби.

Результаты исследований и их обсуждение

Ионный сток

Ионный сток рек бассейна Средней Оби определялся для каждого года суммированием значений за 12 мес., каждое из которых вычислялось как произведение месячного водного стока и среднемесячной суммы главных ионов $\Sigma_и$. Последняя величина рассчитывалась по линейной зависимости между срочными значениями $\Sigma_и$ и расходами воды. Полученные в пределах однородных периодов формирования водного стока последовательности значений годового ионного стока Оби и ее притоков были подвергнуты проверке на случайность и однородность [7]. Результаты этого анализа позволили сделать вывод об относительно устойчивом в

течение 1970–2000-х гг. годовом ионном стоке большинства рек рассматриваемой территории и, вместе с тем, об определенном увеличении зимнего ионного стока рр. Томь, Чулым, Тым, Васюган, Парабель и Чая. Достоверные нарушения однородности в пределах рассмотренных временных интервалов выявлены в случае р. Томь у г. Новокузнецк и р. Кеть у п. Максимкин Яр.

Для однородных периодов были вычислены среднемноголетние значения суммарного ионного стока (табл. 1), составившие для Средней Оби 17...24 млн т/год (1...1,2 г/(с·км^2)), а для ее основных притоков – от 0,3 до 4,2 млн т/год (0,4...2,4 г/(с·км^2)). По результатам расчетов было установлено, что наибольшие значения модуля ионного стока (более 2 г/(с·км^2)) заметно превышают приведенную в работе [9] среднюю величину по бассейну р. Обь (0,44 г/(с·км^2)) и отмечаются в верхнем и среднем течении р. Томь. Это объясняется повышенной интенсивностью водообмена в пределах этой территории и свидетельствует о значительном перераспределении гидрохимического стока внутри водосбора. Наименьшие значения модулей ионного стока приурочены к сильно заболоченным северной и северо-восточной частям бассейна Средней Оби, где получили наибольшее распространение верховые и переходные болота.

Помимо анализа рядов годового и сезонного ионного стока, были изучены долгосрочные изменения подземного ионного стока. Результаты этого исследования свидетельствуют об определенном увеличении подземного ионного стока в последние десятилетия. Особенно заметны эти изменения для некоторых равнинных притоков Средней Оби, протекающих на сильно заболоченных территориях [7]. Норма подземного стока самой Оби в течение 1960–2000-х гг. существенно не изменилась. В целом, подземная составляющая ионного стока варьирует в диапазоне от 20...35 % в водосборе р. Томь до 70...80 % в равнинной части обского бассейна, причем наблюдается ее рост по мере увеличения заболоченности водосборов и уменьшения модулей водного стока. Подземный сток непосредственно р. Обь последовательно возрастает от 47...58 % у г. Колпашево до 50...67 % у с. Прохоркино.

Сток микроэлементов

Удовлетворительные зависимости между расходами воды и концентрациями микроэлементов в общем случае подобрать не удалось. По этой причине сезонный среднемноголетний вынос микроэлементов с водами рек бассейна Средней Оби был определен как произведение среднесезонных значений концентраций веществ и расходов воды, годовой сток – как сумма сезонных значений, а его подземная составляющая – как произведение среднемноголетнего подземного водного стока на среднемноголетнюю концентрацию вещества за декабрь–март. Анализ полученных указанным способом данных показал, что для р. Обь среднемноголетний сток Cu составляет 0,9...1,3 тыс. т/год, Al – 0,8...1,8 тыс. т/год, Pb – около 0,6 тыс. т/год (табл. 2). Подземная компонента обычно составляет менее 50 % годового стока микроэлементов, что указывает на значительное поступление этих веществ в речную сеть с поверхностным стоком с водосборной территории в период снеготаяния и дождевых паводков. При этом следует отметить, что уровень содержания, по крайней мере, некоторых микроэлементов определяется их связью с ве-

Таблица 1. *Среднемноголетний годовой сток главных ионов ($\Sigma_и$), углерода органических веществ ($C_{орг}$), азота неорганических соединений (N), фосфора (P), железа общего (Fe) и нефтепродуктов (Нп) за 1970–2000-е гг., тыс. т/год*

Река – пункт	Сток	Сток веществ					
		$\Sigma_и$	$C_{орг.}$	N	P	$Fe_{общ.}$	Нп
Обь – г. Колпашево	суммарный	17893,04	470,21	50,59	2,68	15,09	40,99
	подземный	8392,69	102,67	22,66	0,49	2,81	9,85
Обь – с. Александровское	суммарный	23862,20	1177,70	118,78	12,60	61,64	69,79
	подземный	13840,08	329,74	35,63	3,53	19,11	9,07
Томь – г. Новокузнецк	суммарный	2809,53	73,14	12,73	0,83	2,41	10,30
	подземный	556,46	7,23	2,37	0,07	0,33	1,73
Томь – г. Томск	суммарный	4228,28	139,47	37,55	1,70	8,48	15,53
	подземный	1071,30	27,44	9,80	0,21	0,68	2,53
Чулым – с. Батурино	суммарный	4017,45	163,00	11,03	0,67	7,42	–
	подземный	1801,60	24,60	5,77	0,05	2,36	–
Кеть – с. Волково	суммарный	1541,52	178,65	–	–	20,24	–
	подземный	986,90	13,22	–	–	–	–
Тым – с. Напас	суммарный	347,53	53,78	–	–	7,20	–
	подземный	231,60	8,12	–	–	1,84	–
Васюган – с. Средний Васюган	суммарный	612,76	76,32	–	0,38	3,59	–
	подземный	265,60	9,97	–	0,09	1,03	–
Парабель – с. Новиково	суммарный	468,23	55,69	6,41	0,07	1,55	1,61
	подземный	276,30	3,85	0,53	0,01	0,13	0,39
Чая – с. Подгорное	суммарный	512,45	44,84	29,80	0,37	1,70	1,15
	подземный	403,10	7,22	8,02	0,27	0,72	0,08

личиной pH и содержанием органических кислот, контролирующих процессы миграции микроэлементов в водной среде [5].

Таблица 2. *Среднемноголетний сток некоторых микроэлементов с водами рр. Обь и Томь, тыс. т/год*

Река – пункт	Сток	Сток веществ			
		Cu	Zn	Pb	Al
Обь – г. Колпашево	суммарный	0,910	–	0,657	0,822
	подземный	0,114	–	0,152	0,217
Обь – с. Александровское	суммарный	1,263	–	–	1,825
	подземный	–	–	–	–
Томь – г. Новокузнецк	суммарный	0,158	–	0,208	0,469
	подземный	0,017	–	0,011	0,048
Томь – г. Томск	суммарный	0,155	0,337	0,143	1,243
	подземный	0,018	0,057	0,017	–

Сток биогенных веществ

Удовлетворительные зависимости от расходов воды в целом не были отмечены и для биогенных веществ, что определило использование того же, что и для микроэлементов, способа оценки их стока. По полученным данным, с речными водами бассейна Средней Оби ежегодно выносится значительное по абсолютной величине количество соединений N, P, Fe и Si (модули гидрохимического стока Средней Оби: N – 3...5 мг/(с·км^2); P – 0,2...0,5 мг/(с·км^2); Fe – 1...2,5 мг/(с·км^2); Si – 23...24 мг/(с·км^2)). Однако в сравнении с главными ионами, сток биогенных веществ значительно меньше и обычно не превышает нескольких процентов от суммарного стока главных ионов, биогенных и органических веществ (табл. 1). Подземная составляющая годового стока биогенных веществ на рассматриваемой территории в целом возрастает по мере увеличения заболоченности водосборов и уменьшения модулей водного стока и составляет в среднем 20...50 %.

Сток органических веществ

Сток органических веществ также определялся как сумма значений сезонного стока, рассчитанных умножением сезонных среднемноголетних значений концентраций веществ и расходов воды. В случае р. Обь он составляет от 400...500 тыс. тС/год (около 30 мг/(с·км^2)) в южной и центральной частях Томской области до 770 тыс. тС/год (49 мг/(с·км^2)) и более в северной части рассматриваемой территории, а в случае основных ее притоков – от нескольких десятков до 178,7 тыс. тС/год (табл. 1). При этом наблюдается определенное увеличение доли органических веществ в суммарном гидрохимическом стоке притоков р. Обь и подземной составляющей в общем стоке органических веществ, с одной стороны, по мере роста заболоченности водосборов и суммарного водного стока, а с другой стороны – при уменьшении модулей последнего. Большая часть органических веществ выносится с поверхностным стоком, причем значительное количество нефтепродуктов и легко окисляемых органических веществ поступает с ливневыми и талыми водами с урбанизированных территорий. Учитывая это обстоятельство и результаты анализа временных изменений среднегодовых значений биохимического и химического потребления кислорода (БПК$_5$ и ХПК) и содержаний нефтепродуктов, можно предположить, что именно сток органических веществ, занимающий второе место по величине после стока главных ионов, испытал наиболее значительное изменение в бассейне Средней Оби за последние несколько десятилетий. В то же время, нельзя не отметить, что в условиях ежегодного прироста болот неизбежно должны происходить изменения и гидрохимического стока [8].

Условия формирования гидрохимического стока

В процессе исследования природно-антропогенной трансформации гидрохимического стока автором был разработан комплекс взаимосвязанных методик оценки условий формирования гидрохимического стока в бассейне Средней Оби и проанализированы наиболее важные из них – приток веществ на рассматриваемую территорию и вынос с нее, поступление из атмосферного воздуха, поступление в процессе водной эрозии почвогрунтов, приток в речную сеть из болот, сброс сточных вод, поступление из неорганизованных антропогенных источников, изменение химического состава вод в результате взаимодействий в системе «вода – порода – органическое вещество». Описание указанных методик приведено в [5, 8, 10]. Выполненные расчеты поступления веществ в водные объекты позволяют получить общую картину и выделить наиболее важные источники и процессы (табл. 3).

Среди них, прежде всего, следует отметить выпадение веществ из атмосферы. Значительный вклад в формирование гидрохимического стока вносит и поступление веществ в результате взаимодействий в системе «вода-порода», а также приток веществ из болот, роль которых заключается не только в изменении выноса тех или иных веществ, но и в формировании геохимической среды в целом. Наиболее значительное антропогенное влияние связано с поступлением в атмосферу, а затем и в водные объекты соединений азота и углеводородов, а также с неорганизованным выносом с урбанизированных территорий биогенных и органических веществ.

Проведенные вычисления не позволили получить гидрохимический баланс для основных показателей в сумме 100 %. В случае главных ионов это объясняется недоучетом роли взаимодействий в системе «вода-порода», а в случае органических веществ – заниженной оценкой влияния болот. С учетом этого вклад взаимодействий в системе «вода – порода» в ионный сток с территории бассейна Средней Оби может составлять до 50 % (6201 тыс. т/год), а вклад болот в сток органических веществ по $C_{орг}$ – до 44 % (442 тыс. т/год). Неожиданный, на первый взгляд, результат расчетов по-

ступления в реки региона неорганических соединений азота предположительно связан с биогеохимическими процессами, приводящими к значительному снижению концентраций азота в речных водах, а значительная невязка баланса веществ, идентифицируемых как нефтепродукты, объясняется природным происхождением не менее половины массы их выноса с речными водами.

Таблица 3. *Соотношение поступления главных ионов, углерода органических веществ, азота неорганических соединений, нефтепродуктов из различных источников к приращению выноса с водами р. Обь в ее среднем течении, %*

Источник (процесс)	Главные ионы	Сорг	N	Нефтепродукты
Атмосферные выпадения	37,4	16,3	150,0	13,6
Поступление в результате взаимодействий в системе "вода-порода"	50,7	–	–	–
Вынос из почв в результате их водной эрозии	–	32,8	9,7	–
Сток с болот	–	44,3	–	–
Сброс стоков	3,8	1,7	18,0	0,8
Неорганизованное антропогенное поступление	8,7	4,9	37,1	40,8
Факторы формирования	Преимущественно природные	Преимущественно природные	Природно-антропогенные	Природно-антропогенные

Согласно [11], допустимая невязка водохозяйственных балансовых расчетов составляет 5...20 %. Принимая во внимание указанные значения, предположим, что при вкладе антропогенных факторов в приращение гидрохимического стока в размере менее 5 % содержание вещества в поверхностных водах определяется природными факторами, в диапазоне 5...20 % – преимущественно природными, более 20 % – природно-антропогенными. Исходя из этого, можно сделать вывод о преимущественно природном происхождении основной части гидрохимического стока в бассейне Средней Оби.

Заключение

В результате комплексного анализа гидрохимической, гидрометрической и гидрогеологической информации установлены среднемноголетние значения суммарного гидрохимического стока в бассейне Средней Оби, составляющего непосредственно для р. Обь 18...25 млн т/год и более, а для ее основных притоков – от 0,5 до 4,4 млн т/год. Основная часть гидрохимического стока представлена макрокомпонентами (85...90 % и более). Достаточно заметный вклад вносит сток органических веществ (от 2 до 13 %). Сток прочих веществ обычно не превышает нескольких процентов от суммарного гидрохимического стока. Распределение по территории модулей гидрохимического стока (1,0...1,2 г/(с·км^2) – для рр. Обь и Чулым, более 2 г/(с·км^2) для р. Томь и ее притоков, менее 1,0 г/(с·км^2) – для равнинных притоков р. Обь) обусловлено широтной зональностью водного стока и минерализации речных вод. Подземная составляющая стока различных веществ варьирует в достаточно широком диапазоне. Для ионного стока она изменятся от 20 % в горных районах до 60 % и более для равнинных притоков р. Обь с сильно заболоченными водосборами. Подземный ионный сток самой Оби последовательно возрастает от 47...58 % у г. Колпашево до 50...67 % у с. Прохоркино. Подземная компонента стока микроэлементов, многих биогенных и органических веществ обычно составляет менее 50 % от соответствующей годовой величины.

Изучение пространственно-временных изменений и условий формирования гидрохимического стока (с учетом результатов, ранее изложенных в [5]) позволило сделать следующие выводы. Во-первых, большая часть гидрохимического стока в бассейне Средней Оби, представленная макрокомпонентами и трудно окисляемыми органическими веществами по величине ХПК, формируется в результате действия преимущественно природных факторов. Во-вторых, антропогенная трансформация гидрохимического стока в течение последних десятилетий в основном проявляется в увеличении выноса углеводородов, легко окисляемых органических веществ по БПК$_5$, неорганических соединений азота, микроорганизмов, поступлении в речную сеть токсичных техногенных органических микропримесей и связана, прежде всего, с загрязнением атмосферного воздуха и неорганизованным поступлением веществ с урбанизированных территорий.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ по гранту № 06-05-96924 Р_ОФИ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вернадский В.И. Химический состав живого вещества в связи с химией земной коры // Биогеохимические очерки. – М.: Изд-во АН СССР, 1940. – С. 9–24.
2. Шварцев С.Л. Гидрогеохимия зоны гипергенеза. – М.: Недра, 1998. – 366 с.
3. Алекин О.А., Бражникова Л.В. Сток растворенных веществ с территории СССР. – М.: Наука, 1964. – 144 с.
4. Савенко В.С. Геохимические проблемы глобального гидрологического цикла // Проблемы гидрологии и гидроэкологии: сб. науч. тр. / Под ред. Н.И. Алексеевского. – М.: МГУ, 1999. – Вып. 1. – С. 48–72.

5. Савичев О.Г. Реки Томской области: состояние, использование и охрана. – Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2003. – 202 с.
6. Савичев О.Г., Макушин Ю.В. Многолетние изменения уровней подземных вод верхней гидродинамической зоны на территории Томской области // Известия Томского политехнического университета. – 2004. – Т. 307. – № 4. – С. 60–63.
7. Савичев О.Г. Ионный сток Средней Оби и ее крупных притоков // Известия Томского политехнического университета. – 2004. – Т. 307. – № 6. – С. 40–44.
8. Савичев О.Г. Условия формирования ионного стока в бассейне Средней Оби // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. – № 2. – С. 54–58.
9. Алекин О.А. Основы гидрохимии. – Л.: Гидрометеоиздат, 1970. – 444 с.
10. Савичев О.Г. Антропогенное поступление железа и органических веществ в речные воды бассейна Средней Оби в пределах Томской области // Известия Томского политехнического университета. – 2002. – Т. 305. – № 6. – С. 405–414.
11. Мелиорация и водное хозяйство. В 5 т. Т. 5. Водное хозяйство / Под ред. И.И. Бородавченко. – М.: Агропромиздат, 1988. – 400 с.

Поступила 12.07.2006 г.

УДК 550.42:577.4(571.1)